

効率的な遠距離オブジェクトの回転操作を可能とする トラックボール型 VR コントローラ

岩井 望* 阿部 優樹* 坂本 大介*

概要. 仮想現実 (Virtual Reality; VR) におけるコントローラを用いた従来のインタラクションは、腕や手首を繰り返し動かす必要があり、手の疲労に繋がりがやすい。特に、ユーザの手の届かない範囲にあるオブジェクトを効率的に回転させることが難しい。本稿では VR における効率的なオブジェクトの操作の実現のため、球形のインタフェースであるトラックボールを使用することを検討する。商用の VR コントローラを改良してプロトタイプを実装し、トラックボールを利用した回転手法を実装した。このトラックボール型のコントローラによる操作手法の性能を評価するため、2つの従来手法を含めた3つの手法間での比較実験を行った。その結果、トラックボール型コントローラによる操作手法は特に手の届かない遠距離のオブジェクトの回転操作に優れており、トラックボールを用いた回転手法の VR インタラクションにおける有用性が示された。

1 はじめに

仮想現実 (Virtual Reality; VR) 技術は、エンタテインメントやデザイン [8]、データ探索 [14] などの分野での活用が進んでいる。これらの VR アプリケーションでは、ユーザはコントローラを使用し、現実と同様に手でオブジェクトの操作を行うことができる。しかし、オブジェクトを回転させるには、腕や手首を回す操作を繰り返す必要があるため、疲労に繋がりがやすい [7]。また、ユーザの手が届かない遠距離のオブジェクト回転操作について、確立された手法が存在するとは言えない。

これらの課題に対し、腕や手首を回す操作に加えて、VR コントローラ上での操作を回転入力に利用する手法が提案されている [9] [10] [12] [13]。最も本研究に関連する重要な研究は Kim らの研究であり、彼らは VR コントローラのトラックパッドを活用する手法を提案した [9] [10]。この手法は、従来の腕や手首による回転操作はそのままに、親指のトラックパッド操作で追加の回転を行う。従来手法に比べて回転操作に伴う疲労が軽減され、特に遠距離のオブジェクトの回転を効率化できる可能性が示されている。しかし、トラックパッドのスイープによる回転操作がユーザにとって直感的でない可能性も示唆された。

そこで我々は、Kim らの手法で用いられていたトラックパッドを、Blender [1] などの 3D グラフィックスソフトウェアで直感性が示されている [5][11] [20]、トラックボールに置き換える手法を提案する。トラックボールは球を転がして入力するため、スイープ操作よりもオブジェクトの回転と入力のマッピングが

直感的になる可能性がある。

本研究の目的は、VR 上の 3D オブジェクトを効率的かつ直感的に回転させる手法を開発することである。その実現のため、まず既存のコントローラを改造し、トラックボールを埋め込んだプロトタイプを開発した。そしてトラックボールによる回転操作を実装し、その有用性と実用性を調査するため、近距離および遠距離のオブジェクトを操作するタスクを用いた実験を実施した。そのパフォーマンスとユーザビリティを、従来のコントローラによる手法、そして Kim らのトラックパッドを利用した手法の2つと比較評価する。

2 関連研究

2.1 VR における仮想 3D オブジェクトの操作手法

VR における仮想 3D オブジェクトの操作手法としては「ダイレクトハンド手法」が主流であり、ユーザは現実と同様に、オブジェクトを掴んで直感的に操作できる。しかし、長時間の使用は腕の疲労に繋がりがやすい [7] [17]。

この課題に対するアプローチの1つとして、腕や手首の操作だけでなく、VR コントローラ上のインタフェースへの入力を活用する手法が提案されている [9] [10] [12] [13]。Kim らは、従来のダイレクトハンド手法に加え、トラックパッドに Arcball [15] と呼ばれる回転操作を実装することで、ダイレクトハンド手法の効率性を維持しながら、大きな回転操作に伴う腕の疲労を軽減することを示した [9] [10]。

また、ダイレクトハンド手法は、遠距離のオブジェクトに対する操作が困難という課題も抱えている。遠距離操作を支援する手法としては、対象との距離

に応じて手の動きをスケールする Direct HOMER (Hand-centered Object Manipulation Extending Ray-casting) [2] が挙げられるが、手の不安定さによる誤差も拡大されるために精度に課題が残る。Kim らはこの「HOMER 手法」とトラックパッドによる回転操作を組み合わせることで遠距離オブジェクトの操作を可能とした。HOMER 手法による 6 自由度 (Degrees of Freedom; DoF) の操作と、トラックパッドによる回転操作が分離されるため効率的であった一方、その 2DoF のスイープ入力を回転に変換する手法は直感的とは言えない可能性があった [10]。我々は、Kim らの手法をトラックボールによる 3DoF の回転操作に拡張することで、直感性も同時に兼ね備えた手法を開発することを目的とする。

2.2 3D オブジェクト操作のためのトラックボールユーザインタフェース

トラックボールは主に PC に対するポインティングデバイスとして用いられる。その一方、3D グラフィックスソフトウェアにおけるオブジェクトの回転制御への活用も提案されている [5][11] [20]。Froehlich らは、トラックボールを使用した 6DoF 入力デバイスを開発し、球の回転をオブジェクトの回転に直接対応させることで回転操作を可能とした [5][11]。商用の 6DoF 入力デバイスよりも、直感的で、速度やユーザビリティに優れる可能性が示されている。VR あるいは拡張現実感 (Augmented Reality) においてトラックボールを活用した研究は存在するが [19] [13] [18]、この球による回転操作を VR におけるオブジェクトの回転操作に応用した研究は我々の知る限り存在しない。

我々は、Kim らの手法を参考に、トラックボールによる回転操作を導入することで、直感的かつ効率的な、近距離および遠距離のオブジェクト操作が行えると考えた。本研究では、既存の VR コントローラのトラックパッドをトラックボールに換装し、球の回転によってオブジェクトを回転できる手法を開発する。

3 プロトタイプ

本研究では、既存の VR コントローラにトラックボールを搭載し、従来の 6DoF オブジェクト操作に加えて、トラックボールによる 3DoF の回転操作を可能にする手法を提案する。この手法を実現するため、プロトタイプを実装した。

3.1 ハードウェアとシステムの実装

プロトタイプの概観を図 1 に示す。VR コントローラには、Kim らの手法で用いられている HTC VIVE コントローラを採用した。まず、西村らがオープンソースとして公開している実装 [6] を参考に回転検知モジュールを作成した。球を設置する台座部

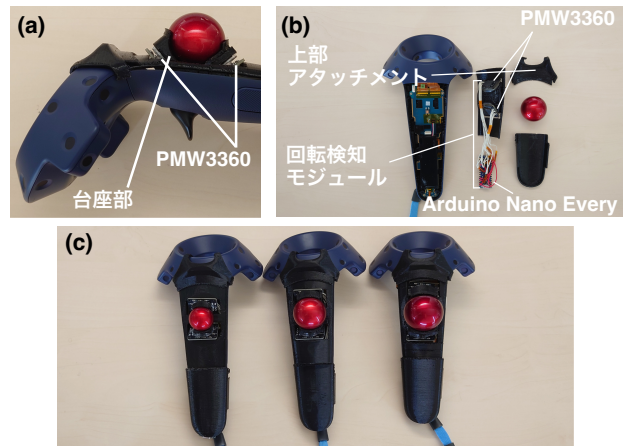


図 1. プロトタイプ実装の概観。34mm の球のプロトタイプ (a) 側面, (b) 内部構造. (c) 実装した 3 種類のプロトタイプ。球の大きさが左から 25mm, 34mm, 40mm。

は西村らの 3D モデルを使用しており、コントローラを傾けた際に球が落下しないよう、球の被覆部分を拡張して 3D プリンタで出力した。拡張は、球を真下に向けても球が落ちず、かつ親指で球を転がした際になるべく摩擦を感じない程度に行った。また、球は台座部から取り外し可能であった。この台座部に 2 つのイメージセンサを 90 度ずらして配置し、球の 3DoF の回転を検知した (図 1a)。2 つのイメージセンサには PixArt 社の PMW3360 を使用した。そして、これらのセンサはマイコンボード (Arduino Nano Every) に接続され、シリアル通信によってデータを Unity に送信することで、VR 上の 3D オブジェクトの回転に反映された (図 1b)。

次に、このモジュールを VIVE コントローラのトラックパッド部分に固定するための部品を、同じく 3D プリンタで出力した。上部アタッチメント (図 1b) については、公開されている 3D モデルを利用し [16]、それ以外の部品については Unity で使用される VIVE コントローラの 3D モデルを利用して作成した。これらの部品を用いて、台座部を、親指での操作にしやすさのために斜めに約 45 度傾けて取り付けた。イメージセンサについては接着剤で台座部に固定し、他の部品については取り外し可能な形状とした。また、3D プリンタのフィラメントには PETG フィラメントを使用した。

3.2 球のサイズの決定

次に、球のサイズを決定するため、この上述のプロトタイプを商用のトラックボールで一般的な直径 25mm, 34mm, 40mm の 3 種類の球で実装し (図 1c)、予備調査を実施した。それぞれの球にはエレコム社、サンワサプライ社、そして LZYYDD 社の球を使用した。予備調査では、6 名の参加者に後述する実験タスクを実施し、使いやすさについての主観

的なフィードバックを収集した。ただし、評価に十分な時間を与えるため、試行回数や順序に制限は設けなかった。その結果、6名中3名が34mmのプロトタイプを最も好み、2名が25mmのプロトタイプを最も好んだ。また、25mmのプロトタイプについては「球を転がす際に摩擦を感じる」、「指に対して球が小さいために一部回転が行いにくい」という意見が得られたため、本研究では34mmのプロトタイプを採用し、実験で用いた。また、VIVE コントローラが203gであったのに対し、34mmのプロトタイプは237gであった。

4 実験

本実験では、VRにおけるトラックボールを用いた回転手法の有用性を調査する。Kimらの実験デザインを参考に、従来手法とKimらのトラックパッドを用いた手法を比較対象とし、近距離および遠距離のオブジェクトに対する操作タスクでそのパフォーマンスとユーザビリティを評価する。近距離タスクは手の届く場所でのタスクであるのに対し、遠距離タスクは直接手が届かないため、VRに特有の操作が必要となるタスクである。

4.1 実験参加者

実験参加者として12名(女性2名, 平均年齢22.5歳, 標準偏差4.17歳)が参加した。利き手は右利きが9名, 左利きが3名で, 全員が利き手で操作を行った。VRは8名に使用経験があり, その頻度は月1回程度が2人, 過去数回程度の使用経験が6名だった。トラックパッドは全員が月1回以上の頻度で使用しており, 10名が週1回以上の頻度で使用していた。トラックボールは5名に使用経験があり, 1名が週1回以上使用, 他4名は過去数回程度の使用経験であった。トラックパッドとトラックボールについてはPCに対するポインティングデバイスとしての使用経験が含まれた。実験の所要時間は約1時間半程度で, 参加者には謝礼として1,000円分のQuoカードを渡した。また, 本実験は, 北海道大学大学院工学研究院及び大学院情報科学研究院 人を対象とする実験研究に関する倫理審査委員会の承認を得ている(承認番号R7-07)。

4.2 実験環境

実験には, CPUにIntel(R) Core(TM) i9-11900K @ 3.50GHz, 32GBのRAM, GPUにNVIDIA GeForce RTX 3060 Tiを搭載したPCを使用した。VRの頭部装着型ディスプレイ(Head Mounted Display; HMD)とコントローラにはHTC VIVE Proを用い, 実験のアプリケーションはUnity ver.2020.3.30f1で開発した。

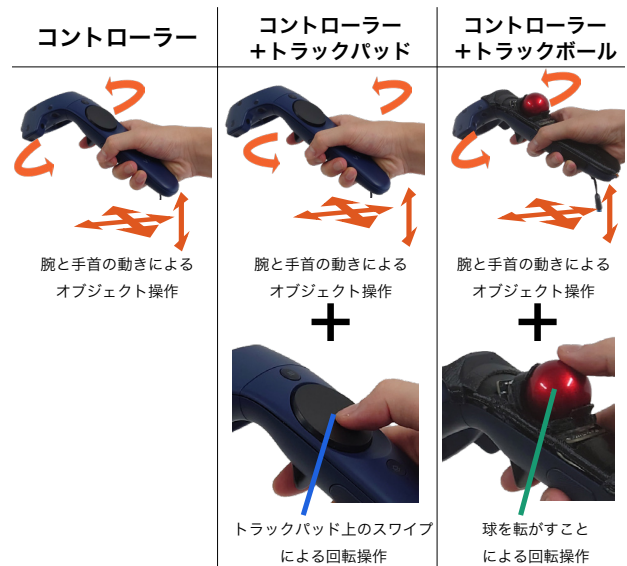


図 2. 3つの入力手法の概観。

4.3 比較手法

コントローラ手法(コントローラ)とコントローラ+トラックパッド手法(トラックパッド), コントローラ+トラックボール手法(トラックボール)の比較を行った。図2にそれぞれの手法の概観を示し, それぞれの入力手法の詳細について以下に示す。

4.3.1 コントローラ手法(コントローラ)

コントローラ手法は, Kimらの先行研究と同様に本実験におけるベースラインであり, コントローラでオブジェクトを掴み, 移動や回転を行う手法である。

近距離操作では, ダイレクトハンド手法により, コントローラがオブジェクトに触れた状態でトリガーを引くと対象を把持できた。その後, 腕や手の動きがオブジェクトの位置と向きに反映された。遠距離操作では, HOMER手法により, コントローラから射出されるレイをオブジェクトに当て, トリガーを引くことで把持できた。その後, コントローラの移動量が掴んだ時点のユーザからオブジェクトまでの距離に応じ, スケールされてオブジェクトに反映された。回転は, コントローラの向きがオブジェクトの向きに1対1で対応されることで制御できた。

4.3.2 コントローラ+トラックパッド手法(トラックパッド)

コントローラ+トラックパッド手法は, Kimらの先行研究で提案された手法であり, コントローラ手法の操作にトラックパッドによる回転操作を追加した手法である[9]。ユーザはオブジェクトを把持した状態で, 親指でトラックパッドをスワイプすることで, オブジェクトを回転させることができた。トラックパッド上のスワイプの指の動きが, HMDの座標に向かうベクトル(カメラ方向)の向きで仮想

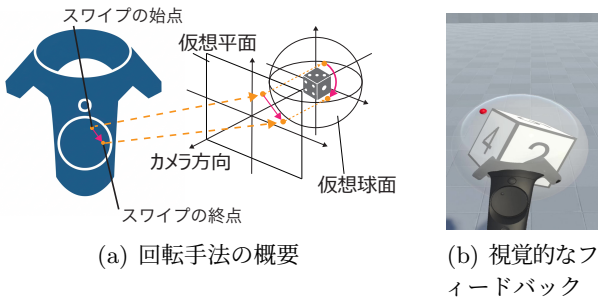


図 3. トラックパッド手法の回転手法の概要と実験参加者に与えられた視覚的なフィードバックの見た目.

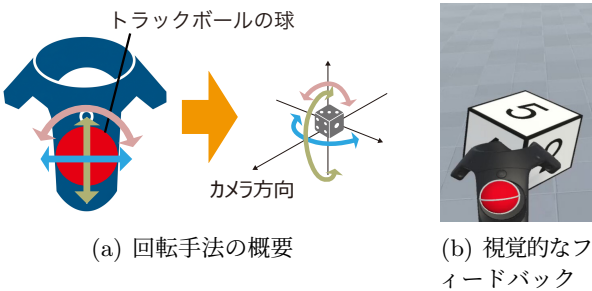


図 4. トラックボール手法の回転手法の概要と実験参加者に与えられた視覚的なフィードバックの見た目.

的な球面上 (仮想球面) にマッピングされ, 回転が計算される (図 3a). 図 3b に示すように, この仮想球面へのマッピングの状態は実験参加者に視覚的にフィードバックされた.

4.3.3 コントローラ+トラックボール手法 (トラックボール)

コントローラ+トラックボール手法は, 3 節で実装したプロトタイプを用いる本研究の提案手法である. トラックパッド手法と同様に, コントローラ手法に加えて, 親指でトラックボールを操作することで追加の回転入力を行う. その際の球の回転が図 4a に示す対応関係においてオブジェクトに反映された. また, 図 4b に示すように, 手元の球の回転が実験参加者に視覚的にフィードバックされた.

4.4 実験タスク

タスクは Kim らの先行研究と同じく, 操作対象のオブジェクトを, 手本のオブジェクトと同様の位置と回転角度に配置するドッキングタスクである [10]. 実験参加者は椅子に座った状態で HMD を被り, このタスクを遂行した. タスクでは, 3 秒のカウントダウンの後に最初の試行を開始し, 参加者の前方に白い不透明なサイコロのオブジェクトと, 赤い半透明のサイコロのオブジェクトを 1 つずつ表示した. 参加者は白いサイコロを各手法で操作し, 赤いサイコロに位置と向きが一致するように移動および回転

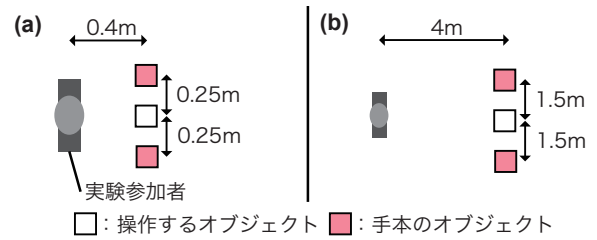


図 5. (a) 近距離タスクと (b) 遠距離タスクにおける, 実験参加者とオブジェクトの位置関係.

させた. サイコロの向きは各面の数字によって特定でき, 2 つのサイコロの位置と向きがある閾値以下で合致すると赤いアウトラインを表示するようにし, その状態を 500ms 維持することで参加者は試行を完了できた. 1 つの試行が完了すると, 1 秒のカウントダウンの後に再びサイコロを表示し, 次の試行を開始した. 参加者はこの試行を繰り返し行った.

このタスクを近距離および遠距離のオブジェクトに対して実施した. 近距離タスクでは各辺 10cm の白いサイコロを参加者の 0.4m 前方に, 同じ大きさの赤いサイコロをその左右のどちらか 0.25m の位置に配置した (図 5a). 遠距離タスクでは各辺 40cm の白いサイコロを参加者の 4m 前方に, 赤いサイコロをその左右のどちらか 1.5m の位置に配置した (図 5b). 誤差の閾値は, 近距離タスクで位置 3cm, 角度 10° , 遠距離タスクでは位置 10cm, 角度 10° とした. 各試行の開始時, 白いサイコロは常に同じ初期状態で提示し, 赤いサイコロはランダムな軸で時計回りに 135° 回転した向きで, 左右どちらかの位置にランダムな順で提示した. ただし, 左右の出現回数は参加者間で同一とした.

4.5 実験デザイン

本実験は参加者内実験計画を用いて行った. 独立変数は手法 (コントローラ, トラックパッド, トラックボール) であり, 手法についてラテン方格法を考慮した順番でタスクを行った. 参加者は各手法において, まず 20 試行で構成される近距離タスクを行い, 次に同じく 20 試行で構成される遠距離タスクを行った. 従って, 各参加者は 3 手法 \times 2 タスク \times 20 試行 = 120 回のオブジェクト操作を行った. また実験参加者は 12 名であるため, 合計 1,440 データが収集された.

従属変数として試行時間と総回転角度 [9] を測定した. 総回転角度は 1 回の試行において実験参加者がオブジェクトを何度回転させたかを表す. 回転操作を行えば行うほど総回転角度は大きくなるため, 総回転角度は手法ごとの回転操作の容易さを測る指標として扱うことができる. また, 主観的な評価として参加者は, 各タスク完了後に NASA Raw Task Load Index (NASA-RTLX) [4] と System Usability Scale (SUS) [3] に基づく 2 つのアンケー

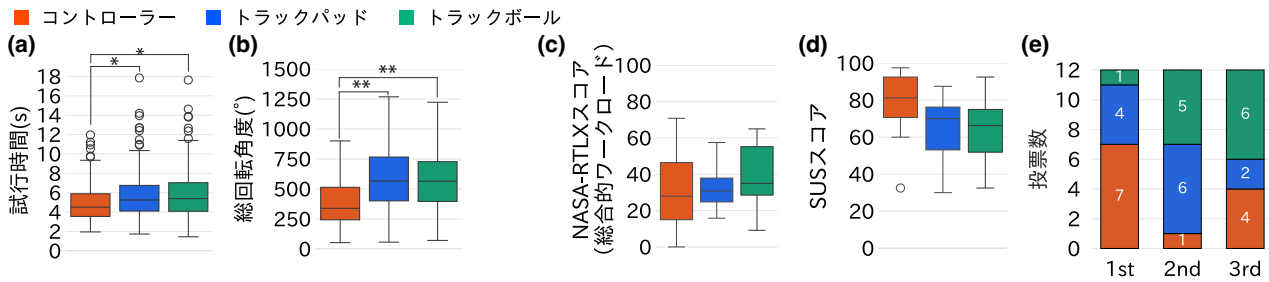


図 6. 近距離タスクにおける手法ごとの (a) 試行時間, (b) 総回転角度, (c) NASA-RTLX の総合的ワークロードの平均スコア, (d) 平均 SUS スコア, (e) 手法の好み (1st が最も好まれたことを意味する). 有意差は * $p < .05$, ** $p < .01$.

ト、そして全試行の終了後に手法の好みの順位とその理由についてのアンケートに回答した。

4.6 実験手順

実験参加者が実験室に到着後、実験の概要を説明し、実験参加の同意書への署名を依頼した。その後、事前アンケートへの回答を求め、タスクと操作手法の詳細を説明した。説明が終了後、参加者は HMD を装着し、1 つ目の手法で近距離タスクの練習を 3 分以上、実験参加者から操作に慣れたという回答が得られるまで行った。練習後に本番タスクを遂行し、完了すると参加者は NASA-RTLX と SUS に基づく 2 つのアンケートに回答した。次に、遠距離タスクの練習と本番タスクを同様にいき、完了後に再度アンケートへの回答を求めた。なお、遠距離タスク前の練習には、操作への慣れや疲労を考慮し、最低時間は設けなかった。上記の手順を 3 つの手法全てで繰り返し、各手法の間には最低 1 分間の休憩を設けた。全てのタスクが完了した後、最後に手法の好みに関するアンケートへの回答を求め、そのアンケートの完了をもって実験を終了とした。

5 実験結果

それぞれの従属変数と、NASA-RTLX と SUS によって得られた値について、フリーマン検定とウィルコクソンの符号順位検定を用い、Holm 法による補正を用いた。手法の好みの順位については加重平均を算出した。

5.1 近距離タスク

5.1.1 試行時間

試行時間に対して手法間に有意な差が確認された ($\chi^2_{2,N=12} = 10.17, p < .01$)。また、事後検定により、コントローラはトラックパッド ($p < .05, r = .47$) とトラックボール ($p < .05, r = .57$) より有意に高速であった (図 6a)。

5.1.2 総回転角度

総回転角度に対して手法間に有意な差が確認された ($\chi^2_{2,N=12} = 15.17, p < .01$)。また、事後検定に

より、コントローラの総回転角度はトラックパッド ($p < .01, r = .71$) とトラックボール ($p < .01, r = .67$) より有意に小さかった (図 6b)。

5.1.3 NASA-RTLX & SUS

NASA-RTLX の総合的ワークロードスコア (低いほど良い) および SUS の総合スコア (高いほど良い) についての平均スコアを図 6c, d に示す。NASA-RTLX の総合的ワークロードスコアに手法間で有意な差は認められなかった。また、同様に SUS スコアについても、総合スコアに有意な差は認められなかった。

5.1.4 手法の好み

実験参加者 12 名中 7 名がコントローラ、4 名がトラックパッド、1 名がトラックボールを最も好んだ (図 6e)。コントローラ、トラックパッド、トラックボールの手法の好みの順位の加重平均はそれぞれ 1.75, 1.83, 2.42 であった (低いほど良い)。

コントローラは「直感的だと感じた (P2, P3, P4, P5, P9, P10, P11)」という理由で好まれ、トラックボールは「意図した方向に転がしづらかった (P3, P6, P7, P8)」や「親指が疲れた (P4, P5, P12)」といった理由で好まれなかった。

5.2 遠距離タスク

5.2.1 試行時間

試行時間に対して手法間に有意な差が確認された ($\chi^2_{2,N=12} = 19.50, p < .01$)。また、事後検定により、トラックボールはコントローラ ($p < .01, r = .71$) とトラックパッド ($p < .01, r = .53$) より有意に高速で、トラックパッドはコントローラより有意に高速であった ($p < .01, r = .71$) (図 7a)。

5.2.2 総回転角度

総回転角度に対して手法間に有意な差が確認された ($\chi^2_{2,N=12} = 18.00, p < .01$)。また、事後検定により、コントローラの総回転角度はトラックパッド ($p < .01, r = .71$) とトラックボール ($p < .05, r = .45$) より有意に小さく、トラックボールの総回

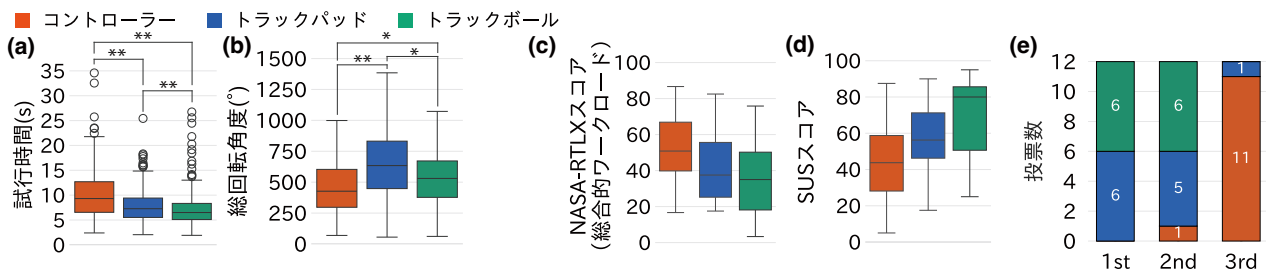


図 7. 遠距離タスクにおける手法ごとの (a) 試行時間, (b) 総回転角度, (c) NASA-RTLX の総合的ワークロードの平均スコア, (d) 平均 SUS スコア, (e) 手法の好み (1st が最も好まれたことを意味する). 有意差は * $p < .05$, ** $p < .01$.

転角度はトラックパッドより有意に小さかった ($p < .05$, $r = .51$) (図 7b).

5.2.3 NASA-RTLX & SUS

NASA-RTLX の総合的ワークロードスコア (低いほど良い) および SUS の総合スコア (高いほど良い) についての平均スコアを図 7c, d に示す. NASA-RTLX の総合的ワークロードスコアに手法間で有意な差は認められなかった. また, 同様に SUS スコアについても, 総合スコアに有意な差は認められなかった.

5.2.4 手法の好み

実験参加者 12 名中 6 名がトラックパッド, 6 名がトラックボールを最も好んだ (図 7e). コントローラ, トラックパッド, トラックボールの手法の好みの順位の加重平均はそれぞれ 2.92, 1.58, 1.50 であった (低いほど良い).

トラックボールは「トラックパッドよりも回転させやすかった (P1, P3, P8, P11)」という理由から好まれ, コントローラは「腕や手首の負担を感じた (P1, P2, P10)」や「直感的ではないと感じた (P5, P12)」という理由から好まれなかった.

6 実験のまとめと考察

本実験で得られた結果を以下に要約する.

- 近距離タスクでは, コントローラが最も高速で, 最も好まれる手法であった. 一方, トラックボールは最も好まれない手法であり, 球の操作に伴う親指への負担が指摘された.
- 遠距離タスクでは, トラックボールが最も高速で, かつ好まれる手法であった. また, トラックパッドの総回転角度は最も大きく, その回転操作が直感的でない可能性があった.
- 実験全体を通じて「トラックパッドよりトラックボールの方が直感的と感じた (P6, P7)」という意見が得られた.

以上の結果から, 近距離のオブジェクト操作においてトラックボールは操作効率の向上に寄与しない

ことが示唆された. NASA-RTLX スコアはコントローラ操作による一定の身体的疲労を示したものの, 現実と同様にオブジェクトを直接掴んで操作できる直感性が, その負担を上回ったと考えられる.

対照的に, 現実とは異なる操作が求められる遠距離タスクでは, コントローラによる操作がかえって直感的ではなかったことが示唆された. 本実験結果は, トラックボールがこの課題を解決する可能性を示している. これは, 物理的な球の回転をオブジェクトの回転に 1 対 1 で反映するメタファが, コントローラによる操作, さらには 2DoF のスワイプ入力を回転に変換するトラックパッド手法よりも, 参加者にとって直感的であったためだと考えられる.

本実験により, トラックボールの利用には利点と欠点が存在することが明らかになったが, これらの知見に基づき, 今後の VR コントローラへのトラックボールの導入を提案する. これにより, 従来のコントローラの近距離オブジェクトの操作や, 物理ボタン等の入力機構をそのままに, 遠距離のオブジェクトの回転操作の効率性の向上が期待できる. その実現のため, 今後はより実践的なタスクや長期利用での効果を検証したい. 特に, 本実験でトラックボール手法の試行時間の結果にばらつきが見られたことから, 長期使用における習熟過程を解析することが, さらなるパフォーマンスとユーザビリティの向上に繋がると考えられる.

7 まとめ

本研究では, VR における効率的な 3D オブジェクトの操作を目的とし, 既存のコントローラにトラックボールを組み込むプロトタイプを作成し, 球による回転操作を用いる手法を提案した. その有用性を検討するため, 近距離および遠距離の操作タスクにおいて, 2 つの従来手法との比較実験を行った. その結果, 特に遠距離タスクにおいて, 提案手法がパフォーマンスと主観的評価に優れる可能性が示された. 本研究で実装したトラックボール型コントローラはプロトタイプであり, 実用化には改善が必要だが, 確立された手法がまだない遠距離のオブジェクト操作に対し, 本手法が有効なアプローチとなり得ることを示せた点に意義があると考えられる.

謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業、JPMJFR226S の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Blender. Blender - The Free and Open Source 3D Creation Software —blender.org. <https://www.blender.org/>, 2025. Accessed: August 31, 2025.
- [2] D. A. Bowman and L. F. Hodges. An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments. In *Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics, I3D '97*, p. 35–ff., New York, NY, USA, 1997. Association for Computing Machinery.
- [3] J. Brooke. SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, 189, 11 1995.
- [4] J. C. Byers, A. C. Bittner, and S. G. Hill. Traditional and raw task load index (TLX) correlations: Are paired comparisons necessary? In A. 1989.
- [5] B. Froehlich, J. Hochstrate, V. Skuk, and A. Huckauf. The GlobeFish and the Globe-Mouse: two new six degree of freedom input devices for graphics applications. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '06*, p. 191–199, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.
- [6] GitHub. ParRot · GitHub. <https://github.com/ParRot-3DMouse>, 2025. Accessed: August 31, 2025.
- [7] J. D. Hincapié-Ramos, X. Guo, P. Moghadasian, and P. Irani. Consumed endurance: a metric to quantify arm fatigue of mid-air interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14*, p. 1063–1072, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [8] S. Kalantari and J. R. J. Neo. Virtual Environments for Design Research: Lessons Learned From Use of Fully Immersive Virtual Reality in Interior Design Research. *Journal of Interior Design*, 45, 05 2020.
- [9] S. Kim and G. Lee. Virtual Trackball on VR Controller: Evaluation of 3D Rotation Methods in Virtual Reality. In *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '23*, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [10] S. Kim and G. Lee. Evaluating an In-Hand Ball-Shaped Controller for Object Manipulation in Virtual Reality. In *2024 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 10–19, 2024.
- [11] A. Kulik, J. Hochstrate, A. Kunert, and B. Froehlich. The influence of input device characteristics on spatial perception in desktop-based 3D applications. In *2009 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pp. 59–66, 2009.
- [12] J. Lee, M. Sinclair, M. Gonzalez-Franco, E. Ofek, and C. Holz. TORC: A Virtual Reality Controller for In-Hand High-Dexterity Finger Interaction. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '19*, p. 1–13, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [13] C. Lim, J. Kim, and M. J. Kim. Thumble: One-Handed 3D Object Manipulation Using a Thimble-Shaped Wearable Device in Virtual Reality. In *Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '22 Adjunct*, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [14] K. Marriott, F. Schreiber, T. Dwyer, K. Klein, N. H. Riche, T. Itoh, W. Stuerzlinger, and B. H. Thomas. *Immersive Analytics*. Vol. 11190. Springer, 2018.
- [15] K. Shoemake. ARCBALL: a user interface for specifying three-dimensional orientation using a mouse. In *Proceedings of the Conference on Graphics Interface '92*, p. 151–156, San Francisco, CA, USA, 1992. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [16] Thingiverse. HTC Vive Joystick mod. by 3DaptiveClint - Thingiverse. <https://www.thingiverse.com/thing:2705398>, 2025. Accessed: August 31, 2025.
- [17] D. Yu, T. Dingler, E. Velloso, and J. Goncalves. Object Selection and Manipulation in VR Headsets: Research Challenges, Solutions, and Success Measurements. *ACM Comput. Surv.*, 57(4), Dec. 2024.
- [18] D. B. Zhao and W. Stuerzlinger. A Novel Bare-Handed Manipulation Technique for Distant Objects in Virtual Reality. In *2025 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 353–360, 2025.
- [19] 岩井 望, 崔 明根, 坂本 大介, 小野 哲雄. AR 入力デバイスとしての身体装着型トラックボールの検討. *インタラクション 2024 論文集*, pp. 68–77, 2024.
- [20] 西村 陽向, 高橋 伊織, 成瀬 宏亮. トラックボール型 3D マウス ParRot の提案と評価. *インタラクション 2025 論文集*, pp. 818–823, 2025.

未来ビジョン

既存の VR コントローラでは、入力インタフェースとしてジョイスティックやトラックパッドが主流であり、トラックボールの使用は検討されてこなかった。我々は本研究を基に、VR コントローラへのトラックボールの導入を推進したい。本研究は、トラックボール型の VR コントローラが、遠距離オブジェクトの操作効率を向上させる可能性を示した。これは、VR 空間内でのワールド制作といった大規模な創作活動を促進し、さらには、遠距離のオブジェクトを直感的な操作による新たなゲーム体験の創出にも寄与すると考える。

加えて、本コントローラは VR におけるアクセシビリティの向上にも繋がる可能性があると考えられる。トラックボールは少ない手の動きで操作が可能のため、上肢の運動機能に制約のあるユーザにとって扱いやすいデバイスとなり

得る。また、「ごろ寝マウス」や「空中マウス」と呼ばれる、臥位での使用を想定した手持ち型のトラックボールが市販されており（図 8）、本コントローラも寝ながらの VR 利用に適している可能性が示唆される。本研究では回転操作に着目したが、今後はアクセシビリティの観点からも調査を進め、多様なユーザが快適な VR 体験を享受できる未来の実現を目指す。



図 8. エレコム株式会社. ワイヤレスハンディトラックボール M-RT1DRBK